

**Список литературы**

1. Гнесин Г.Г., Фоменко С.Н. Износостойкие покрытия на инструментальных материалах (обзор) // Порошковая металлургия. 1996. № 9-10. 172 с.
2. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справочник / под ред. Косолаповой Т.Я. М.: Металлургия, 1986. 928 с.
3. Андриевский Р.А., Сливак И.И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе. Справочник. Ч.: Металлургия, 1989. 368 с.
4. Самсонов Г.В. Нитриды. К.: Наукова думка, 1969. 380 с.
5. Анищик В.М., Углов В.В., Злоцкий С.В., Емельянов В.А., Пономарь В.Н., Ухов В.А. Многослойные наноструктурированные покрытия TiN/ZrN: структура и механические свойства // Перспективные материалы. 2003. № 4. С. 75-78.
6. Musil J., Dohnal P., Zeman P. Physical properties and high-temperature oxidation resistance of sputtered Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/MoN<sub>x</sub> nanocomposite coatings // J. Vac. Sci. Technology. 2005. V. 23. № 4. P. 1568-1574.
7. Кунченко В.В., Кунченко Ю.В., Картимзов Г.Н., Неклюдов И.М., Мигаль А.А., Романов А.А., Гладких Н.Т., Крышталь А.П., Казаринов Ю.Г. Наноструктурные сверхтвердые покрытия nc-TiN/α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, полученные методом вакуумно-дугового осаждения // Вопросы атомной науки и техники. 2006.–№ 4. С. 185-190.
8. Кунченко Ю.В., Кунченко В.В., Неклюдов И.М., Картимзов Г.Н., Андреев А.А. Слоистые Ti-Cr-N-покрытия, получаемые методом вакуумно-дугового осаждения // Вопросы атомной науки и техники. 2007. № 2. С. 203-214.
9. Холлек Х. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов / Ред. Ю.В. Левинский. М.: Металлургия, 1988. 319 с.
10. Musil J., Daniel R., Zeman P., Takai O. Structure and properties of magnetron sputtered Zr-Si-N films with a high (≥25 at.%) Si content // Thin Solid Films. 2005. V. 478. P. 238-247.

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR DURABILITY AND CHEMICAL-RESISTANT COATINGS BASED ON QUATERNARY NITRIDE SYSTEM

Yeldar Zhakanbayev<sup>1)</sup>, Valeriy Volodin<sup>1)</sup>, Yuriy Tuleushev<sup>1)</sup>, S. Zlotsky<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Institute of Nuclear Physics, Ibragimov, 1 St, Almaty, Republic of Kazakhstan, lab\_ipt@mail.ru

<sup>2)</sup>Belarusian State University, Nezavisimosti ave., 4, Minsk, 220030, Belarus, uglov@bsu.by

In this paper the synthesis technology of protective coatings based on complex nitrides, by magnetron sputtering using the effect of thermal fluctuation point. As a result of this work is designed technological equipment, allowing to obtain a mixture of complex nitrides with four independent channels of spraying. Also developed cleaning argon nitrogen mixture supplied to the chamber, and the contactless drive system moving substrate within the chamber.

## ВАКУУМНО-ДУГОВОЕ ПЛАЗМЕННО-АССИСТИРОВАННОЕ ОСАЖДЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ: ОБОРУДОВАНИЕ, СИНТЕЗ, СВОЙСТВА

Н.Н. Коваль<sup>1, 2)</sup>, О.В. Крысина<sup>1, 2)</sup>, В.В. Шугуров<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), пр. Академический, 2/3, Томск, 634055, Россия,

koval@opee.hcei.tsc.ru, krysina\_82@mail.ru, shugurov@opee.hcei.tsc.ru

<sup>2)</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 32, Томск, 634050, Россия

Представлено ионно-плазменное оборудование для модификации поверхности материалов и изделий, а также для напыления покрытий в дуговых разрядах низкого давления. Показаны преимущества использования источника газоразрядной плотной плазмы на всех этапах формирования покрытий (очистка, нагрев, активация поверхности в плазме инертных газов; плазменно-ассистированное осаждение покрытий). Приведены примеры нанесения износостойких покрытий на конкретные изделия и характеристики этих покрытий.

**Введение**

Вакуумно-дуговой метод широко применяется для ионно-плазменной модификации поверхностного слоя материалов и изделий, а также синтеза функциональных покрытий [1-2]. Традиционный метод КИБ (конденсация с ионной бомбардировкой) подразумевает генерацию металлической плазмы при испарении материала катода катодным пятном и последующую конденсацию покрытия из плазмы дугового разряда при формировании металлических покрытий или при наличии в камере молекулярного реактивного газа – нитридных, карбидных, оксидных или других покры-

тий более сложного состава. Замена молекулярного газа на ионизированный приводит к интенсификации фазообразования, трансформации структуры покрытия в более мелкозернистую и к улучшению адгезии покрытия с подложкой. Очистка и активация подложек перед осаждением покрытий проходит обычно путем бомбардировки ускоренными в приповерхностном слое металлическими ионами при приложении потенциала ~1 кВ к подложке. Такая предварительная обработка поверхности образцов может приводить не только к очистке, нагреву и активации поверхности, но и изменению элементного и фазового состава

поверхностного слоя изделий, что не всегда допустимо. С этой точки зрения предварительная очистка и активация поверхности подложек ускоренными ионами инертных газов более привлекательна. Как на первом этапе (очистка и активация поверхности), так и на втором этапе (осаждение) процесса напыления покрытий перспективно применение источника газоразрядной плазмы. Тогда процесс очистки и активации будет проходить посредством плазмы инертного газа, а напыление покрытий возможно проводить в режиме плазменного ассистирования.

В данной работе представлено оборудование для ионно-плазменных процессов модификации поверхности и вакуумно-дугового нанесения покрытий с использованием источников газоразрядной и металлической плазмы, представлены примеры износостойких покрытий и их свойств, показаны преимущества и возможности данного ионно-плазменного оборудования.

### Основная часть. Оборудование

Ионно-плазменная установка «КВИНТА» для модификации поверхности материалов и изделий и вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осаждения покрытий [3] разработана, сконструирована и создана в лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН. Схема установки приведена на рисунке 1.

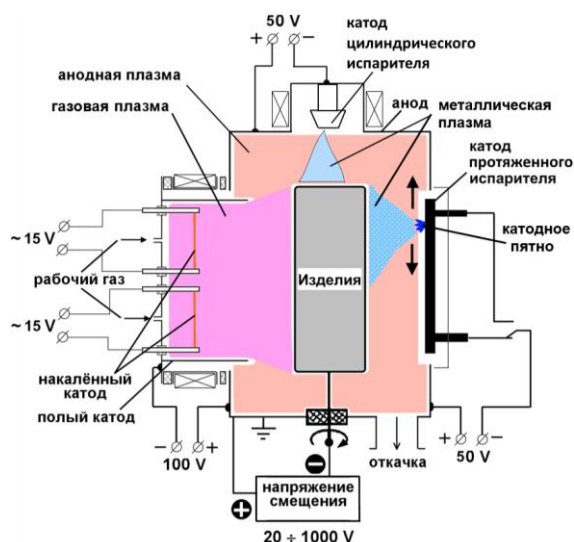


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Установка оснащена тремя дуговыми испарителями с цилиндрическими катодами диаметром 80 и 100 мм, протяженным дуговым испарителем ДИ400 с катодом длиной 400 мм и протяженным плазменным источником с комбинированным накаливаемым и полым катодами ПИНК-П-04М с длиной рабочей зоны 400 мм. Обрабатываемые детали устанавливаются на изолированный от камеры стол с системой планетарного вращения деталей, на который может подаваться отрицательное напряжение смещения величиной до 1 кВ с помощью совмещенного блока подачи импульсного и стационарного отрицательного напряжения смещения. Его основными параметра-

ми в импульсном режиме являются величина отрицательного напряжения смещения  $U_b$  (0 – 1000 В), коэффициент заполнения импульса  $\tau$  (10 – 90 %), частота следования импульсов  $f$  (10 – 50 кГц).

Благодаря оснащению ионно-плазменной установки плазменными источниками различной конфигурации с различными диапазонами рабочих параметров, возможно проведение независимых и комплексных процессов обработки металлических поверхностей в плазме дуговых разрядов низкого давления. Например, можно проводить очистку, нагрев и активацию поверхности в плазме инертных газов; азотирование или оксидирование в дуговых разрядах низкого давления; вакуумно-дуговое плазменно-ассистированное осаждение покрытий простого и сложного состава, моно- и многослойных, градиентных. Благодаря наличию протяженных источников газовой и металлической плазмы возможна модификация поверхности и напыление покрытий на крупногабаритные детали.

Осаждение ионно-плазменных покрытий обычно проводят, как многоэтапный процесс в едином вакуумном цикле. В случае вакуумно-дугового осаждения с плазменным ассистированием на первом этапе используется аргоновая плазма низкого давления ( $n \sim 10^9 - 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) на основе несамостоятельного дугового разряда. С помощью ионов рабочего газа с энергией в интервале  $\sim (100 - 1000) \text{ эВ}$  эффективно проводится очистка поверхности образцов ионно-плазменным травлением тонкого поверхностного слоя от оксидных пленок, диэлектрических включений и адсорбированных газов. На втором этапе производится нанесение вспомогательного подслоя ( $n \sim 100 \text{ нм}$ ) для увеличения адгезии основного покрытия с подложкой. На третьем этапе - непосредственно синтез основного покрытия (3-5 мкм) при испарении материала катода дуговым разрядом с катодным пятном. Синтез покрытий вакуумно-дуговым методом на втором и третьем этапах осуществляется в режиме плазменного ассистирования при относительно низком давлении ( $\sim 0.1 \text{ Па}$ ), т.е. конденсация покрытий происходит из смешанной газометаллической плазмы ( $n \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ). При этом формируется покрытие плотной структуры (без внедрения атомов газа), а непрерывная бомбардировка растущего покрытия низкоэнергетическими ионами рабочего газа позволяет удалять с поверхности адсорбированный газ и измельчать структуру растущего покрытия.

Одной из отличительных особенностей используемого в работе метода вакуумно-дугового осаждения является использование композиционных катодов таких систем как Ti-Cu, Ti-Al, Ti-Si, Ti-Cr и др. Такие катоды получают спеканием порошков в вакууме или СВС-методом. Применение композиционных катодов позволяет получать поток смешанной плазмы по сравнению со случаем, когда одновременно испаряются нескольких одноэлементных катодов. Характеристики композиционных катодов с концентрацией дополнительного элемента  $\leq 15 \text{ ат. \%}$  аналогичны или превосходят эксплуатационные свойства катодов из

сплава ВТ1-0, традиционно используемого для синтеза нитридититановых покрытий [4-5].

### Примеры износостойких покрытий

Ниже приведено несколько примеров увеличения износостойкости конкретных деталей после осаждения покрытий вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом на ионно-плазменном оборудовании, представленном в данной работе:

1. После нанесения на поверхность метчиков для глухого отверстия, изготовленных из быстрорежущей стали (Maykestag), покрытия TiN/Ti-Cu-N общей толщиной 3 мкм срок их службы увеличился, более чем в 4 раза.
2. Комплексная ионно-плазменная обработка (азотирование в дуговом разряде низкого давления и последующее нанесение покрытия Ti-Cu-N) на металлокерамические ножи для гранулирования пластмассы позволила увеличить срок их службы в 4,5 раза.
3. Осаждение многослойного покрытия TiN/Ti-Cu-N на твердосплавную торцевую фрезу позволило увеличить срок службы в 3 раза.
4. Благодаря использованию источника газоразрядной плазмы ПИНК удалось провести нанесение покрытий в отверстия воздушных сопел двигателей производства Омского машиностроительного конструкторского бюро, которые в процессе работы подвергаются пылевой эрозии. Показано, что покрытие проникает внутрь отверстия Ø 1,4 мм на расстояние, превышающее 6 мм. Измерение толщины покрытия показало, что на входе в отверстие она составила 4 мкм, на расстоянии 3 мм от торца сопла – 3 мкм, при минимально необходимой толщине в 2 мкм. На торце сопла толщина покрытия составила 12 мкм, при этом не наблюдалось его отслаивания.
5. Синтез многослойных покрытий TiN и Ti-Cu-N на поверхности ножа, выполненного из нержавеющей стали, позволило увеличить его стой-

кость при резании джутового каната диаметром 16 мм более, чем в 3 раза.

### Заключение

В докладе описано ионно-плазменное оборудование для модификации поверхности материалов и изделий, а также для напыления покрытий в дуговых разрядах низкого давления. Приведены преимущества использования источника газоразрядной плотной плазмы на всех этапах формирования покрытий, таких как очистка, нагрев, активация поверхности в плазме инертных газов до напыления покрытия и плазменно-ассистированное осаждение покрытий. Представлено несколько примеров использования ионно-плазменного оборудования для упрочнения конкретных изделия и увеличения их срока службы после нанесения износостойких покрытий.

Работа выполнена частично за счет грантов РФФИ (№13-08-98108-р\_сибирь\_a, №14-08-00997-a).

### Список литературы

1. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления / В.А. Барвинок, В.И. Богданович. М.: Машиностроение, 1999. 309 с.
2. Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. 236 с.
3. Kalushevich A.A., Koval N.N., Denisov V.V., Yakovlev V.V., Shugurov V.V. Automated vacuum ion-plasma installation. // Изв. ВУЗов. Физика. 2012. № 12/3. С. 118-122.
4. Pribytkov G.A., Korostelyeva E.N. et al. // Proceedings: VII Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Tomsk, Russia, July 25-29, 2004, P.167-170.
5. Крысина О.В. // Материалы конференции «Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии: Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых» (19-21 октября 2009 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. С. 229-232.

## PLASMA-ASSISTED VACUUM-ARC DEPOSITION OF WEAR-RESISTANT COATINGS: EQUIPMENT, SYNTHESIS, CHARACTERISTICS

Nikolay Koval<sup>1, 2</sup>, Olga Krysina<sup>1, 2</sup>, Vladimir Shugurov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS, Russia 634055 Tomsk, 2/3 Akademicheskoy ave., koval@opee.hcei.tsc.ru, krysina\_82@mail.ru, shugurov@opee.hcei.tsc.ru

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Russia 634050 Tomsk, 32 Lenin ave.

The ion-plasma equipment for modification of materials and products surface and for coating deposition in arc low-pressure discharges. The advantages of a source of gas-discharge dense plasma for use at all stages of coating synthesis processes (cleaning, heating and activation of the specimen surface in plasma of inert gases; plasma-assisted deposition of coatings). The examples of wear-resistant coatings for products and characteristics of these coatings are given.